

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. Ломоносова

Физический факультет
кафедра общей физики и физики конденсированного состояния

Методическая разработка
по общему физическому практикуму

Задача № 61

ИЗУЧЕНИЕ ВОЛЬТАМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА

Работу поставили

доценты: Авксентьев Ю.И., Антипов С.Д., Горюнов Г.Е.

Москва 2017 г.

Подготовил методическое пособие к изданию доц. Авксентьев Ю.И.

ИЗУЧЕНИЕ ВОЛЬТАМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА

Вольтамперной характеристикой (*ВАХ*) диода называется заданная в виде таблицы или графика зависимость тока диода I от напряжения U .

На рис 1 дано графическое изображение теоретической вольтамперной характеристики идеального диода.

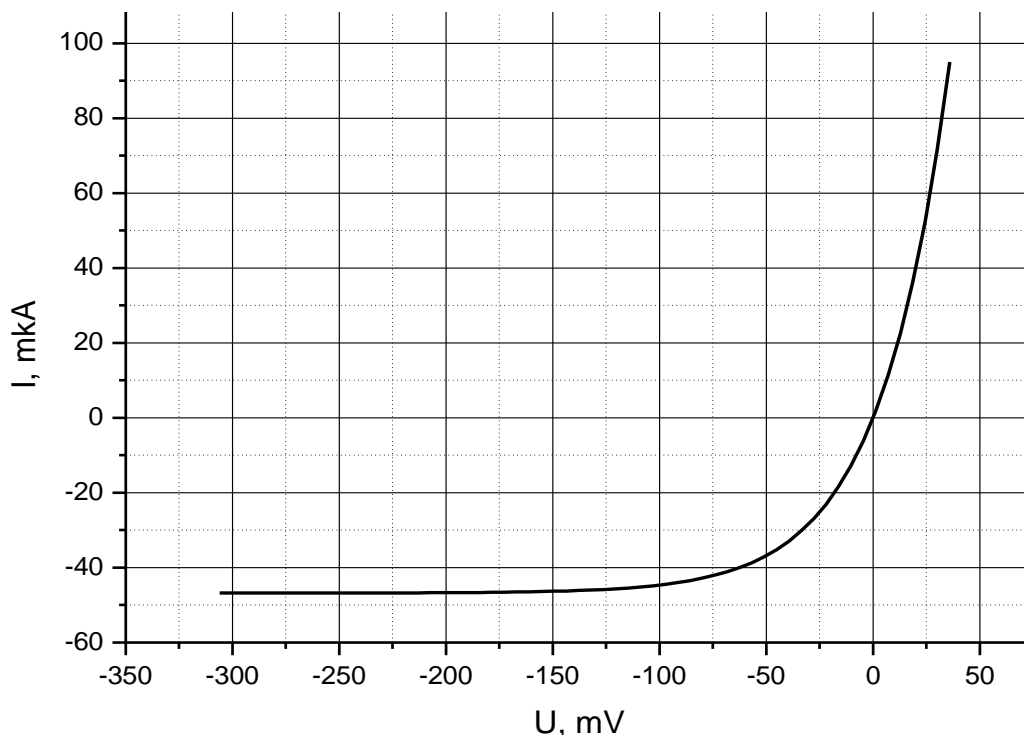


Рис. 1

Теоретически вольтамперная характеристика диода может быть получена из распределения Больцмана для электронов или дырок на границах p - n перехода. Впервые такие расчеты были выполнены Шокли. Согласно его расчетам вольтамперная характеристика идеального диода имеет вид

$$I = I_s (\exp (eU/kT) - 1), \quad (1)$$

где I_s - ток насыщения, обусловленный тепловой генерацией неосновных носителей заряда в областях, прилегающих к областям пространственного заряда p - n перехода, e - заряд электрона, k - постоянная Больцмана, U - напряжение на диоде, T - абсолютная температура.

Формулу (1) можно переписать в следующем виде

$$I = I_s \exp (U/\varphi_T) - I_s, \quad (2)$$

где первый член описывает диффузионный ток p - n перехода, второй - дрейфовый ток, создаваемый неосновными носителями в p и n областях и

направленный противоположно диффузионному, $\varphi_T = \kappa T/e$ - температурный потенциал. При комнатной температуре $\varphi_T = 26$ мВ.

Формула (2) описывает зависимость тока от напряжения как в прямом направлении, так и в обратном. В прямом направлении U имеет положительный знак, в обратном направлении - отрицательный. Из этого следует, что при прямом смещении ($U > 0$) ток диода возрастает, а при обратном смещении ($U < 0$) ток становится малым и с ростом $|U|$ приближается к значению I_s . При напряжении на p-n переходе равном нулю ($U = 0$) диффузионный ток равен дрейфовому и суммарный ток согласно (2) равен нулю.

Как было сказано выше, уравнение

$$I = I_s (\exp (U/\varphi_T) - 1) \quad (3)$$

представляет собой вольтамперную характеристику идеального диода. Это означает, что при его выводе учитывались только диффузионный и дрейфовый токи через p-n переход. В реальном переходе кроме этих токов существуют токи I_{pm} , обусловленные рекомбинацией и термогенерацией носителей, возникающие вследствие наличия в полупроводнике примесных уровней *посторонних* элементов. Эти токи необходимо учитывать в области малых токов через диод. Учитываются они путем введения коэффициента m при φ_T . Коэффициент m получил название *фактор не идеальности*. Для идеального диода фактор не идеальности m равен единице. В реальных диодах он находится обычно в диапазоне $1 \leq m \leq 2$. В области больших токов на вольтамперную характеристику оказывает влияние сопротивление электронной и дырочной областей r_l за пределами запирающего p-n слоя. При прохождении тока I на сопротивлении r_l падает часть напряжения внешнего источника и вследствие этого на запирающем слое действует напряжение, которое меньше приложенного U на величину $I \cdot r_l$. С учетом рассмотренных поправок уравнение вольтамперной характеристики (3) приобретает вид

$$I = I_0 (\exp ((U - I \cdot r_l) / m \cdot \varphi_T) - 1), \quad (4)$$

где I_0 - ток насыщения с учетом токов рекомбинации и термогенерации I_{pm} .

В области малых токов поправкой $I \cdot r_l$ можно пренебречь. В этом случае уравнение (4) приобретает вид

$$I = I_0 (\exp (U/t) - 1), \quad (5)$$

где $t = m \cdot \varphi_T$.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА

Одним из основных параметров полупроводникового диода является его дифференциальное сопротивление $R_{дифф.}$, равное по определению $R_{дифф.} = dU/dI$. Используя формулу (5), для прямой ветви вольтамперной характеристики ($U, I > 0$) получим:

$$1/R_{\text{дифф.нр.}} = dI/dU = (I_0/t) \cdot \exp(U/t). \quad (6)$$

Из формулы (5) также следует:

$$(I + I_0) / I_0 = \exp(U/t). \quad (7)$$

Окончательно для $R_{\text{дифф.нр.}}$ получаем:

$$R_{\text{дифф.нр.}} = t / (I + I_0), \quad (8)$$

К числу основных параметров полупроводникового диода можно отнести и его полное сопротивление постоянному току $R_{\text{полн.нр.}} = U/I$.

Из формулы (5) путем не сложных преобразований получаем:

$$R_{\text{полн.нр.}} = (t / I) \cdot \ln((I + I_0) / I_0). \quad (9)$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Принципиальная электрическая схема для измерения ВАХ представлена на рис 2. Схема собрана на пластине из стеклотекстолита и позволяет

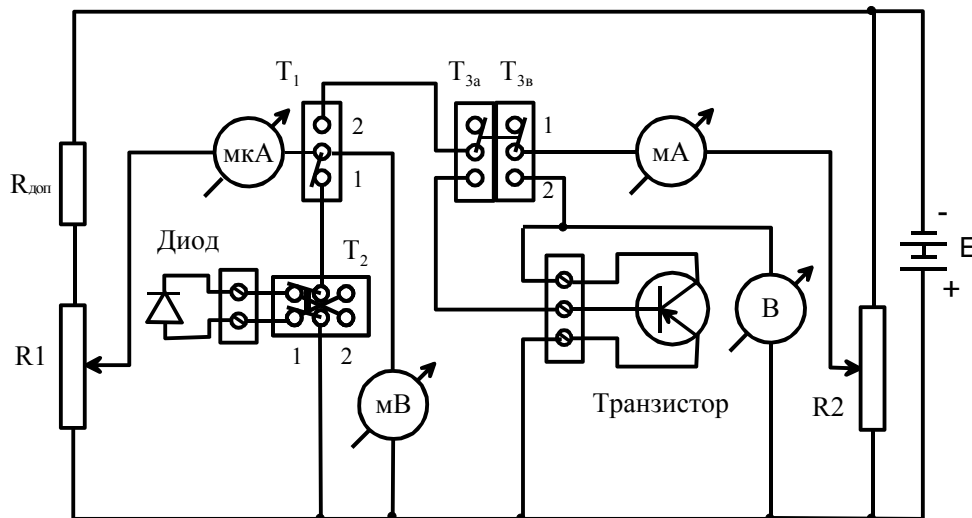


Рис. 2

измерять вольтамперные характеристики диодов и входные и выходные характеристики транзисторов. В дальнейшем при описании схемы мы будем касаться только тех элементов схемы, которые имеют отношение к измерению вольтамперных характеристик диодов.

Вид панели со стороны органов управления представлен на рис. 3. Диод подключается к специальной колодке и удерживается в ней винтами. Выбор режима работы с диодом осуществляется с помощью переключателей T_1 , T_3 , каждый из которых имеет два устойчивых положения - 1 и 2.

Токи в схеме измеряются комбинированным цифровым прибором Щ300 , (мкА) - рис. 4, напряжения - комбинированным цифровым прибором В7-35 , (мВ) - рис.5.

Сопротивление R_1 служит для изменения напряжения на диоде.

Питание схемы осуществляется от стабилизированного источника постоянного напряжения $B5 - 47$, - рис. 6.



Рис. 6

Подготовка установки к работе. Перед включением установки необходимо:

а) Установить переключатели выходного напряжения и тока в источнике питания $B5-47$ равными соответственно 9 В и $2,55\text{ А}$.

б) Переключатель диапазона измерений микроамперметра $Щ300$ установить в положение 1 mA .

в) Переключатели выбора режима измерения милливольтметра

$B7-35$  (по левую и правую сторону лицевой панели, см. рис. 5)

установить в положения - постоянное напряжение  режим измерения

напряжения $mV - V$  .

г) Установить переключатели T_1 и T_3 на панели управления (рис. 3) в положение 1 (режим работы с диодом). Переключатель T_2 установить в положение 2, (режим измерения обратного участка вольтамперной характеристики диода). Ручку потенциометра R_1 повернуть до упора против часовой стрелки.

Включение установки. Перед включением установки убедитесь в том, что на схему будет подано напряжение нужной полярности. Указатели полярности на вилке и розетке, однополюсных вилках и выходных клеммах $B5-47$ должны совпадать. Включить источник питания $B5-47$ и измерительные приборы $Щ300$

и В7-35. Сетевые выключатели у первых двух приборов расположены на лицевых панелях, в приборе В7-35 - на задней панели справа (это ползунок, который надо передвинуть вверх). После выполнения указанных операций и пятиминутного прогрева установка готова к измерениям.

УПРАЖНЕНИЕ 1 **ИЗМЕРЕНИЕ ОБРАТНОЙ ВЕТВИ ВОЛЬТАМПЕРНОЙ** **ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИОДА Д7Г**

Потенциометром R_1 поочередно устанавливайте обратное напряжение на диоде согласно *Таблице данных* (см. *Приложение*). Как указано в таблице, начинайте измерения с напряжения -300 мВ. При установке напряжений не обязательно добиваться целых значений, указанных в *Таблице*). При отклонении U от табличных значений внесите соответствующие изменения в таблицу у себя в тетради. Результаты измерений напряжений U и токов I занесите в *Таблицу данных*.

УПРАЖНЕНИЕ 2 **ИЗМЕРЕНИЕ ПРЯМОЙ ВЕТВИ ВОЛЬТАМПЕРНОЙ** **ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИОДА Д7Г**

Закончив измерения в последней точке обратной ветви вольтамперной характеристики, установите переключатель T_2 в положение I для измерения прямой ветви вольтамперной характеристики. Значения напряжений, при которых рекомендуется провести измерения, так же указаны в *Таблице данных*. При отклонении U от табличных значений внесите соответствующие изменения в таблицу данных у себя в тетради. Результаты измерений напряжений U и токов I занесите в *Таблицу*.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Результаты измерений обработайте в лаборатории на компьютере.

Определите значения I_0 , t и $m = t / 26$ (см. формулу (5)). По формулам (8) и (9) вычислите дифференциальное $R_{\text{дифф}}$ и полное $R_{\text{полн}}$ сопротивление на

прямой и обратной ветвях вольтамперной характеристики в точках $A[40 \text{ мВ}]$ и $B[-40 \text{ мВ}]$. При вычислениях сопротивлений на обратной ветви вольтамперной характеристики значения I подставляйте в формулы со знаком минус.

При ручной обработке результатов измерений:

а) на миллиметровой бумаге постройте график зависимости $I = f(U)$ обратной и прямой ветви вольтамперной характеристики диода Д7Г. Экспериментальные точки соедините плавной кривой. Убедитесь в том, что полученная зависимость имеет такой же вид, как и на рис. 1,

б) в точках A_n и B_n с координатами $[X_n, Y_n]$, где $X_n = \pm 40 \text{ мВ}$, вычислите дифференциальные $R_{\text{дифф.}}$ и полные $R_{\text{полн.}}$ сопротивления на прямой и обратной ветви ВАХ. Дифференциальное сопротивление вычисляйте по формуле

$$R_{\text{дифф.}} = (X_{n+1} - X_{n-1}) / (Y_{n+1} - Y_{n-1}), \quad (10)$$

Полное сопротивление - по формуле

$$R_{\text{полн.}} = X_n / Y_n, \quad (11)$$

ЛИТЕРАТУРА.

САВЕЛЬЕВ И.В. Курс общей физики: Учеб. Пособие в 5 кн. Кн.5. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц - 4-е изд., перераб.- М.:Наука. Физматлит. 1998. - 368 с.

Глава 8. Электропроводность металлов и полупроводников.

§ 8.6. Электропроводность полупроводников.

§ 9.5. Полупроводниковые диоды и триоды.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица данных.

№	Обратное и прямое напряжение на диоде Д7Г, мВ	Обратный и прямой ток диода Д7Г, мкА
1	-300	...
2	-250	...
3	-200	...
4	-150	...
5	-130	...
6	-110	...
7	-90	...
8	-70	...
9	-50	...
10	-40	...
11	-30	...
12	-20	...
13	-10	...
14	- 0	...
15	0	...
16	10	...
17	20	...
18	30	...
19	40	...
20	50	...